

Костарев В. С., Климова В. А., Таишыков О. Л.
slavakostarev@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПАССИВНОГО ОТВОДА ОСТАТОЧНЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С УЧЕТОМ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ

Аннотация. Приведены результаты моделирования и обоснования расчетов режимов пассивного отвода остаточного тепла от радиоактивных отходов в зависимости от погодных условий.

Ключевые слова: остаточные тепловыделения, радиоактивные отходы, погодные условия.

Abstract. The simulation and justifying calculations of the modes of passive removal of residual heat from radioactive wastes subject to weather conditions are described.

Keywords: residual heat, radioactive wastes, weather conditions.

Введение

Проблема утилизации радиоактивных отходов (РАО) находится на одном уровне с другими экологическими проблемами современного мира. По мере роста населения и технологического развития наблюдается постоянный рост количества радиоактивных отходов.

Правильный сбор, хранение и утилизация радиоактивных отходов является довольно сложным и трудоемким процессом, поэтому критерии применимости контейнеров для радиоактивных отходов включают удельную активность, структуру и другие характеристики РАО.

Этап кондиционирования радиоактивных отходов заканчивается производством компактной формы, пригодной для хранения и транспортировки. Таким образом, этот этап должен учитывать специфику перерабатываемых радиоактивных отходов и требования следующих этапов переработки.

При планировании расположения контейнеров для их хранения или транспортировки учитываются следующие факторы [1]:

- удельная теплоотдача;
- расстояние между контейнерами;
- теплофизические свойства загружаемых отходов;

– погодные условия, такие как инсоляция, потоки воздуха, температура окружающей среды.

При размещении нескольких контейнеров также важно учесть, что основная часть тепла отводится через боковую сторону контейнера. Поскольку теплообмен между несколькими емкостями с теплоизлучающим веществом и окружающей средой представляет собой сложную для расчета задачу, компьютерное моделирование здесь становится эффективным инструментом анализа [2].

Авторы уже исследовали режимы естественного охлаждения контейнеров РАО методами вычислительной гидродинамики [3]. Была выявлена оптимальная форма контейнера и предложены способы интенсификации пассивного отвода тепла, такие как ребристость. Полученные результаты показали хорошее совпадение с теоретической оценкой.

В настоящей работе было проведено численное моделирование влияния погодных условий на охлаждение контейнеров с РАО. В качестве исходных данных были взяты объем, толщина стенки и материал контейнера.

Объект исследования

Для исследования была создана компьютерная модель контейнера НЗК-150-1,5П, предназначенного для хранения битумных жидких радиоактивных отходов [1]. Контейнер имеет форму прямоугольного параллелепипеда высотой 1650 мм, длиной 1650 мм и шириной 1375 мм. Объем внутреннего пространства $1,5 \text{ м}^3$. Толщина стенок принимается постоянной. Контейнер изготовлен из литого бетона. Модель состоит из четырех контейнеров, расположенных в четырех углах бетонной плиты ($7 \times 7 \times 1 \text{ м}^3$), как показано на рис. 1. Модель была создана с помощью программного обеспечения Solidworks.

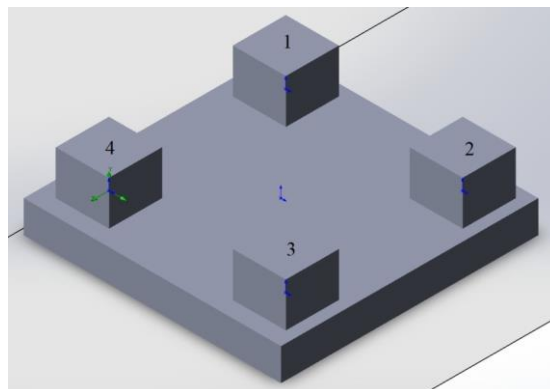
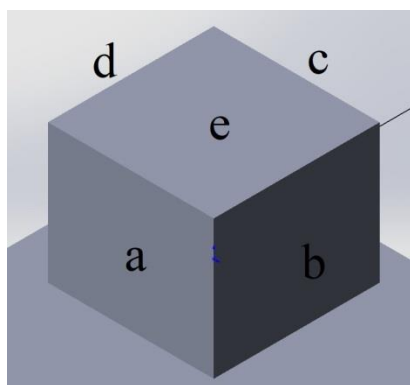


Рисунок 1 – Модель контейнера (1) и расположение контейнеров на плите (2)

Постановка задачи компьютерного моделирования

Теплообмен между контейнером и окружающей средой включает в себя следующие процессы:

- теплопроводность через стенку контейнера обеспечивает отвод тепла от внутренних источников тепла;
- разница в плотности между пристенным воздухом и воздухом, удаленным от поверхности, создает теплообмен посредством естественной конвекции;
- приход солнечного излучения производит дополнительный нагрев стенок контейнера;
- возможна принудительная конвекция, которая зависит от скорости и направления ветра;
- влажность воздуха влияет на теплообмен с точки зрения теплофизических свойств.

Погодные условия на открытом воздухе, очевидно, влияют на процессы теплообмена. Но из-за большого количества переменных факторов невозможно смоделировать реальное состояние среды. Таким образом, были сделаны некоторые упрощения и предположения.

Прежде всего, рассматривалась внешняя задача. Внутреннее пространство контейнера было заполнено «твердым» источником тепла мощностью 2 кВт/м^3 . Конвекция и неоднородность в содержимом контейнера не учитывались. В моделирование были включены такие физические особенности, как теплопроводность в твердых телах, гравитация и теплообмен излучением. Скорость окружающего воздуха принималась равной нулю, то есть моделирование проводилось в отсутствие ветра.

Материал контейнера рассматривался как теплопроводящая стенка. Его теплообменные свойства, такие как коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность, были взяты из [1].

С другой стороны, стенка контейнера представляет собой поверхность, взаимодействующую с солнечным излучением. Ее степень черноты была принята 0,85, а коэффициент поглощения солнечного излучения – 0,7. Это характеристики грубого бетона.

Применяемая в задаче солнечная радиация определялась через поток мощности и вектор направления [4, 5]. В качестве входных данных использовались географическая широта Екатеринбурга ($56^\circ 51'$) и температура окружающего воздуха (рис. 2). Моделирование проводилось для нескольких

дней, которые имеют характерную температуру и условия инсоляции в течение года. Момент времени также требуется для расчета угла падения света, оно было принято 12:00.

Оценка надежности модели и верификация

Также было выполнено экспериментальное исследование для оценки достоверности результатов моделирования.

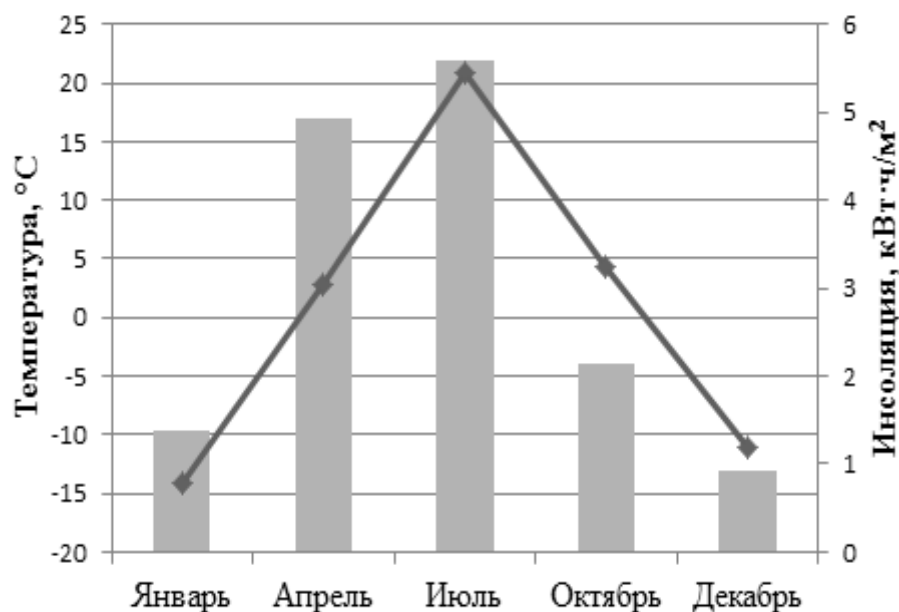


Рисунок 2 – Исходные данные для моделирования влияния инсоляции на теплообмен: ♦ – средняя температура месяца, ° C; ■ – средняя инсоляция месяца, кВт·ч/м²

Для этого в течение полутора часов с 11:00 до 12:30 18.04.2019 измерялась температура стены здания. Термопара была установлена на освещаемой солнцем наружной поверхности здания. Температура окружающей среды была +3 ° C. Здание отапливалось, поэтому его внутреннее пространство можно рассматривать как источник тепла с постоянной температурой 24 ° C.

Была создана компьютерная модель, аналогичная описанной ситуации. Расчет показал хорошее совпадение с результатами эксперимента, за исключением того факта, что температура стенки значительно изменилась с порывами ветра. Моделирование было выполнено в отсутствие ветра.

Основные физические особенности этого случая аналогичны задаче теплообмена контейнеров с окружающей средой. Таким образом, упрощенная

проверка показала, что температура стенки может быть довольно высокой даже в холодный день в случае инсоляции и внутренних источников тепла.

Результаты и обсуждение

Моделирование охлаждения контейнеров с радиоактивными отходами с помощью естественной конвекции с учетом инсоляции на открытом воздухе привело к зависимости средней температуры стенки контейнера от погодных условий. Результаты моделирования в виде средней температуры стенки контейнера приведены в таблице 1. Боковые стенки обозначены а, b, с, d; е – верхняя крышка. Номера контейнеров соответствуют рис. 1. На рис. 3 показано распределение температуры на стенке контейнера в январе и июле.

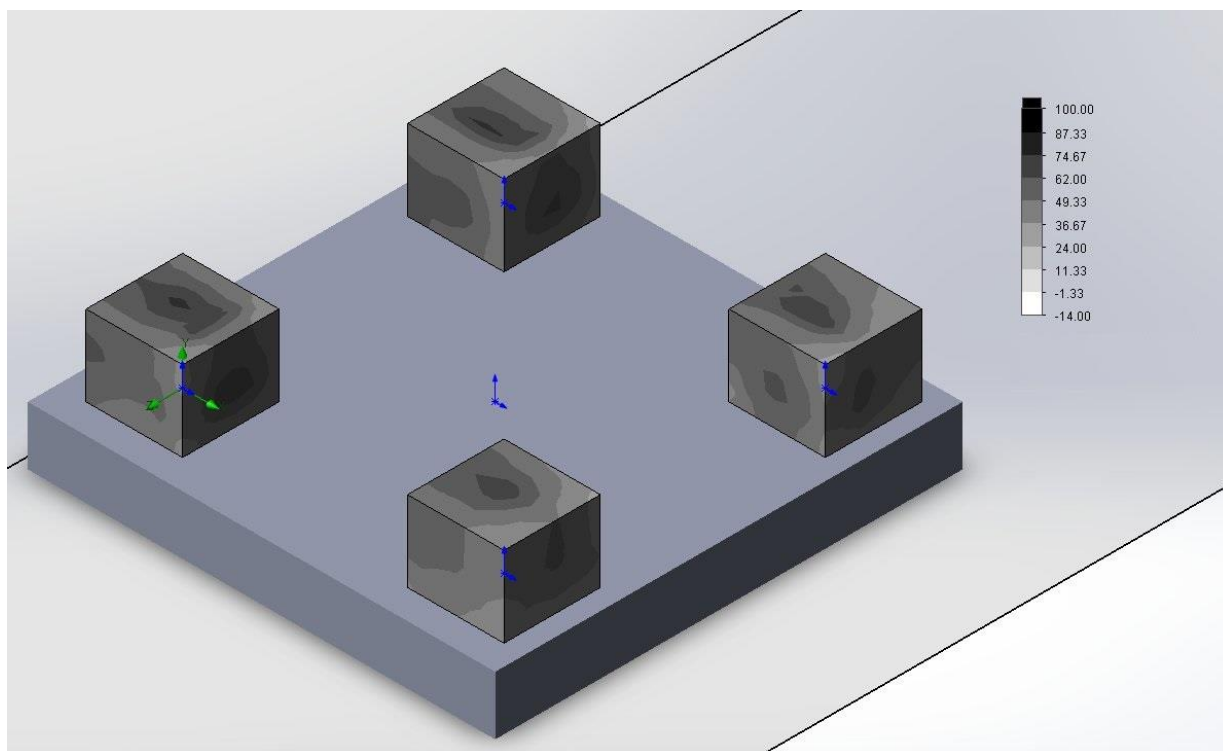
Таблица 1 – Результаты моделирования в виде средней температуры стенки контейнера, ° С

Месяц	Контейнер1					Контейнер 2				
	а	б	с	д	е	а	б	с	д	е
Январь	30.7	21.9	25.1	51.9	45.3	26.5	17.1	21.5	41.2	43.6
Апрель	44.1	36.9	39.8	65.2	56.8	40.0	31.9	36.6	56.0	55.9
Июль	59.6	52.3	55.6	79.7	69.6	55.6	47.8	52.4	70.7	68.3
Октябрь	48.4	38.0	41.5	66.4	59.0	41.9	33.3	37.8	56.6	56.5
Декабрь	32.2	24.4	27.7	54.1	47.0	28.8	19.6	24.2	45.2	45.9
Месяц	Контейнер 3					Контейнер 4				
	а	б	с	д	е	а	б	с	д	е
Январь	20.9	19.7	24.3	42.4	45.8	25.6	25.3	30.3	52.0	51.2
Апрель	36.1	34.8	38.4	58.3	58.0	39.4	39.0	43.2	65.9	60.8
Июль	51.7	50.8	53.7	73.1	70.8	55.3	54.6	58.3	80.1	73.3
Октябрь	37.1	36.1	39.9	59.1	58.6	41.1	40.1	45.1	66.6	62.1
Декабрь	23.5	22.4	26.7	44.8	48.0	28.2	27.6	31.7	54.3	53.0

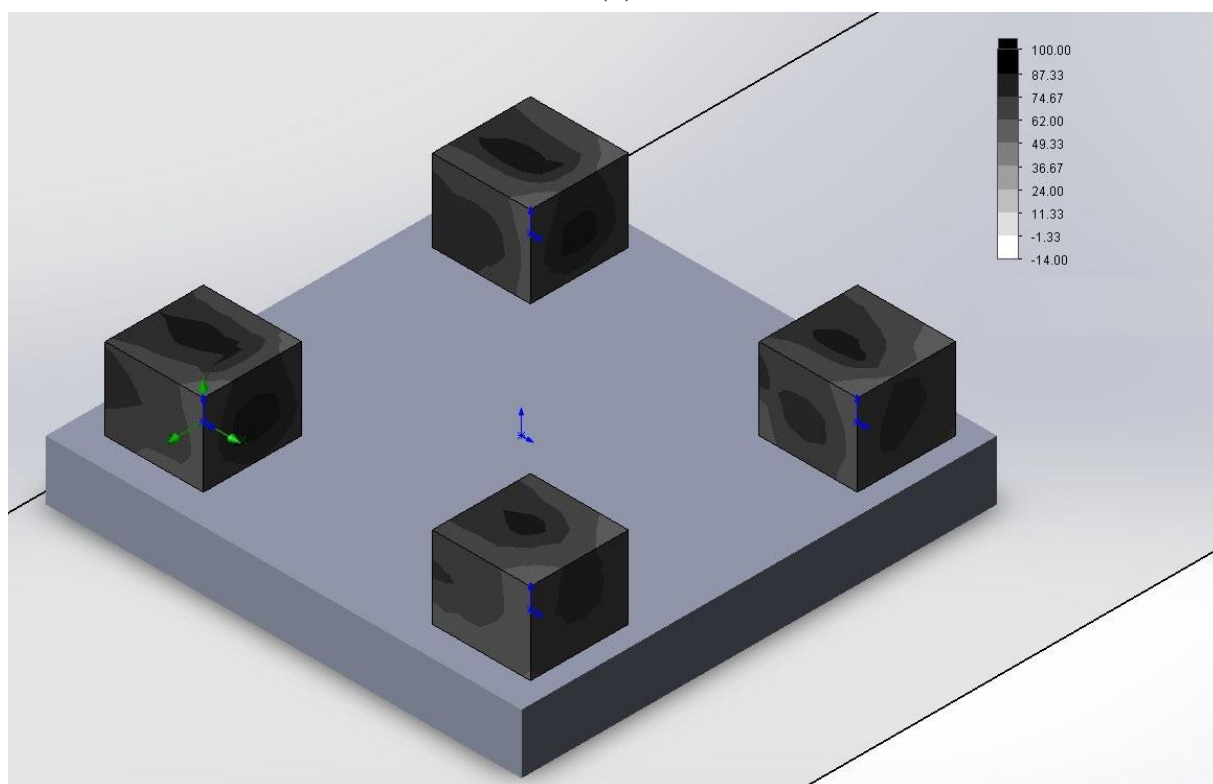
Заключение

Моделирование проводилось в диапазоне температур окружающей среды от –15 до +23 ° С, которые являются обычными для среднего Урала. Температура сторон контейнера варьируется от 17,1 ° С до 80,1 ° С, а верхняя часть контейнера нагревается от 43,6 ° С до 73,3 ° С.

Температура поверхности контейнера с радиоактивными отходами поддерживается в допустимых пределах в течение всего года, кроме июля. Можно сделать вывод, что в июле необходимо использовать навесы или другие средства для предотвращения перегрева вследствие инсоляции.



(a)



(b)

Рисунок 3 – Результаты моделирования за (а) январь и (б) июль в виде распределения температуры на стенке контейнера

Библиографический список

1. Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности / В. Т. Сорокин, А. В. Демин, В. В. Кашеев [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2013. – № 2 (68). – С. 15–22.
2. Костарев В. С. Моделирование режимов естественного охлаждения контейнеров с радиоактивными отходами / В. С. Костарев, В. А. Климова, О. Л. Ташлыков // Физика. Технологии. Инновации (ФТИ–2018) : тез. докл. V Междунар. молодеж. науч. конф., посвящ. памяти Почетного проф. УрФУ В. С. Кортova : Секция 5 / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Физ.-техн. ин-т. – Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2018. – С. 18–19
3. Костарев В. С. Моделирование режимов пассивного охлаждения контейнеров с радиоактивными отходами / В. С. Костарев, В. А. Климова, О. Л. Ташлыков // Ядерные технологии: от исследований к внедрению (Нижний Новгород, 21 нояб. 2018 г.) : сб. материалов науч.-практ. конф. / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. – С. 14–15.
4. Елистратов В. В. Солнечные электростанции. Оценка солнечной радиации / В. В. Елистратов, В. А. Грилихес, Е. С. Аронова // Солнечные энергоустановки. Оценка поступления солнечного излучения : учеб. пособие / В. В. Елистратов, В. А. Грилихес, Е. С. Аронова ; под ред. В. В. Елистратова. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 73–92.
5. SolidWorks Flow Simulation : техн. справка. – 2015. – URL: https://help.solidworks.com/2015/russian/SolidWorks/floxxpress/c_flow_simulation_overview.htm (дата обращения: 13.08.2019).